Transports Canada
Développement

Transport Canada
Development

TP 3790F

Étude des propriétés des aciers pour emploi aux basses températures

Rapport sommaire

Préparé pour le
Centre de développement
des transports
Transports Canada

JUILLET 1982

Canada

CA1
DTC 801
82
R27SZ
c.2

TP 3790F

ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS DES ACIERS POUR EMPLOI AUX BASSES TEMPÉRATURES

RAPPORT SOMMAIRE

Préparé pour le

Centre de développement des transports

par

Fenco Consultants Ltd.
et
Lloyd's Register of Shipping

Library and Information Centre / Centre de Documentation (GSLA)
RECEIVED - REÇU LE
OCT 2 1985
Transport Canada / Transports Canada

Juillet 1982

Le contenu du présent rapport ne reflète que les opinions des auteurs et ne saurait en aucun cas engager les politiques et positions officielles du Centre de développement, Transports Canada.

Also available in English under the title "A Review of Steel Properties at Low Temperatures", TP 3790E.

FORMULE DE DOCUMENTATION POUR RAPPORT

1. Nº du rapport Transports Canada	2. Nº de l'étude — CDT	3. Nº de catalogue du destinataire
TP 3790F	4003	

4. Titre et sous-titre	5. Date du rapport
Étude des propriétés des aciers pour emploi aux basses températures	Juillet 1982
	6. Nº du rapport de l'organisme exécutant: 5883

7. Auteur(s)	8. Nº de dossier Transports Canada
G. Almond, G. Gauthier, A.E. Wright	D 1460-129-1

9. Nom et adresse de l'organisme exécutant	10. Nº de dossier — ASC
FENCO Consultants Ltd. (Compagnie nationale de forage et sondage Inc.) 1130 ouest, rue Sherbrooke Montréal, Québec H3A 2R5	17SV.T8200-9-9502
	11. Nº de contrat — ASC ou Transports Canada: 0SV79-00021

12. Nom et adresse de l'organisme parrain	13. Genre de rapport et période visée
Centre de développement des transports Complexe Guy-Favreau, 200 o., boul. Dorchester Suite 601, tour ouest Montréal, Québec H2Z 1X4	Sommaire
	14. Code de l'organisme parrain: CDT 4003

15. Remarques additionnelles	16. Agent de projet — CDT
Sommaire du rapport principal TP 2717.	I.M. Bayly

17. Résumé

Ce rapport rassemble la documentation générale sur l'utilisation des aciers aux basses températures, et notamment en ce qui a trait à la rupture par fragilité de ces aciers. Un tour d'horizon des techniques courantes a été fait, fondé sur les huit critères suivants:

1. environnement arctique;
2. normes actuelles touchant les aciers pour emploi aux basses températures, utilisées en construction navale;
3. règles de l'art concernant les applications de l'acier pour basses températures;
4. codes touchant les applications de l'acier aux basses températures et dans les conditions arctiques;
5. qualités d'acier existantes ou à l'étude;
6. méthode courante de contrôle d'un acier destiné à l'emploi aux basses températures;
7. considérations sur l'enrayage de la fissuration;
8. contrôle des méthodes de soudage.

Il propose et définit une gamme de techniques d'essais pour l'évaluation des propriétés de l'acier et du métal d'apport, considérées sous le rapport de la rupture par fragilité, techniques que tout programme visant l'enrayage de la fissuration devrait adopter. De plus, il développe une méthodologie de sélection fondée sur les probabilités de fissuration des diverses qualités d'acier répondant aux impératifs structurels et aux conditions climatiques, selon les endroits et les situations.

18. Mots-clés	19. Diffusion
Cryogénie, construction navale, propriétés de l'acier aux basses températures, rupture par fragilité, fissuration de l'acier, enrayage de la fissuration, aciers de qualité marine.	Le CDT dispose d'un nombre limité d'exemplaires.

20. Classification de sécurité (de ce rapport)	21. Classification de sécurité (de cette page)	22. Nombre de pages	23. Prix
non classifié	non classifiée	21	-

REPORT DOCUMENTATION FORM

1. Transport Canada Report No.	2. TDC Project No.	3. Recipient's Catalogue No.
TP 3790F	4003	

4. Title and Subtitle	5. Report Date
Étude des propriétés des aciers pour emploi aux basses températures	July 1982
	6. Performing Organization Report No. 5883
7. Author(s) G. Almond, G. Gauthier, A.E. Wright	8. Transport Canada File No. D 1460-129-1
9. Performing Organization Name and Address FENCO Consultants Ltd. (National Boring & Sounding Inc.) 1130 Sherbrooke St. West Montreal, Quebec H3A 2R5	10. DSS File No. 17SV.T8200-9-9502
	11. DSS or Transport Canada Contract No. 0SV79-00021
12. Sponsoring Agency Name and Address Transportation Development Centre Guy Favreau Complex, 200 Dorchester Blvd. W. Suite 601, West Tower Montreal, Quebec H2Z 1X4	13. Type of Report and Period Covered Summary
	14. Sponsoring Agency Code TDC 4003
15. Supplementary Notes Summary of main report TP 2717	16. TDC Project Officer I.M. Bayly

17. Abstract

The summary report assembles world-wide information on the use of steels for low temperature situations with particular reference to brittle fracture. A review of the state-of-the-art was conducted based on the following eight main topics:

1. environmental conditions in Arctic waters
2. present low temperature steel standards for ships
3. current experience with steel for low temperature usage
4. existing codes for use of steel in low temperature and Arctic conditions
5. steels available or under development
6. current method for checking steel for low temperature use
7. crack arrester philosophy
8. techniques used to test welding procedures.

The report proposes the selection and definition of test procedures required for the evaluation of the fracture related properties of steel and weld metal and their application in a fracture control plan. The report also develops a possible "risk" methodology for the selection of the various grades of steel to suit the structural needs and temperature conditions of different locations and operational situations.

18. Key Words	19. Distribution Statement
Cryogenics, ships, low temperature properties of steel, brittle fracture, steel cracking, crack arrest, Marine steels.	Limited number of copies available from sponsoring agency.

20. Security Classification (of this report)	21. Security Classification (of this page)	22. No. of Pages	23. Price
Unclassified	Unclassified	21	-

TDC.CDT 79-005

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION 1

2. TOUR D'HORIZON TECHNIQUE 2
   2.1 Connaissance de l'environnement arctique 2
   2.2 Normes applicables aux aciers pour emploi aux basses températures 2
   2.3 État des connaissances sur l'utilisation des aciers aux basses températures 3
   2.4 Codes régissant l'utilisation des aciers aux basses températures et en milieu arctique 4
   2.5 Aciers ordinaires ou spéciaux 5
   2.6 Méthodes courantes de contrôle des aciers pour emploi aux basses températures 5
   2.7 Arrêt de propagation de fissure 6
   2.8 Agrément des procédés de soudage 7

3. SÉLECTION DES ESSAIS ET DÉFINITION DES MODES OPÉRATOIRES 8
   3.1 Introduction 8
   3.2 Essais Charpy 8
   3.3 Mesure du COD 9

4. SÉLECTION DES ACIERS PAR ANALYSE DES RISQUES 10
   4.1 Introduction 10
   4.2 Concept de risque 11
   4.3 Ruptures 11
   4.4 Paramètres 11
   4.5 Caractère probabiliste des paramètres 12
   4.6 Modèle mathématique de base 12

5. CONCLUSIONS 14

1. INTRODUCTION

En adoptant la Loi sur la prévention de la pollution des eaux arctiques par les navires, le gouvernement canadien a pris l'initiative d'émettre des spécifications, des réglements et des normes en matière de construction de navires devant naviguer dans les eaux de l'océan Arctique.

À cet égard, l'élément le plus préoccupant reste la fragilité des aciers aux basses températures. Il est vrai qu'il existe des aciers étudiés pour ne pas perdre de leur tenacité par temps très froid, mais ils reviennent beaucoup plus cher que les aciers de construction ordinaires.

Ceci dit, aucune spécification ni aucune réglementation ne saurait être utile à moins de tenir compte de tous les aspects de la question et de porter, à ce titre, non seulement sur les aciers eux-mêmes, mais aussi sur les méthodes de fabrication et de mise en oeuvre, sur le calcul des ouvrages à construire et sur l'évaluation probabiliste des risques inhérents aux charges de service et aux contraintes admises.

Dans le but d'aider la Garde côtière canadienne dans la rédaction d'une réglementation appropriée, le Centre de développement des transports (CDT) a confié l'étude des aciers pouvant être utilisés aux basses températures, à la firme Fenco Consultants Ltd., de concert avec le Lloyd's Register of Shipping.

Le but de cette étude était de rassembler toutes les connaissances acquises dans le monde entier sur les aciers convenant aux basses températures, ceci pour les besoins de la réglementation en préparation. En effet, celle-ci doit définir les marges de sécurité devant être assurées par les aciers considérés et par les assemblages soudés de ces aciers, les contrôles qualitatifs et les vérifications normales des demi-produits. Le législateur devra avoir à l'esprit la grande variété des missions qui pourront être confiées aux nombreux navires de cote arctique qui seront construits pour naviguer dans les mers septentrionales, qu'il s'agisse d'activités commerciales ou de service commandé.

2. TOUR D'HORIZON TECHNIQUE

2.1 Connaissance de l'environnement arctique

La navigation maritime dans les eaux arctiques et la tenue des structures aux conditions de navigation dans ces eaux exigent des méthodes de calcul, de fabrication et d'essai fondamentalement différentes de celles utilisées à l'égard des navires conçus pour naviguer dans des eaux tempérées. Or, afin de pouvoir définir et élaborer une réglementation applicable aux navires de cote arctique, une connaissance approfondie du milieu est indispensable.

Ce rapport fait un tour d'horizon des grands problèmes auxquels doit faire face la navigation arctique, notamment les très basses températures ambiantes et les conditions de glaciation très dures. En effet, lorsque les qualités d'acier utilisées en architecture navale sont exposées aux conditions hivernales de la navigation arctique, elles se trouvent pour la plupart à des températures au-dessous des températures de transition auxquelles elles perdent de leur tenacité pour devenir fragiles. D'autres contraintes, nées des impacts avec les glaces, viennent dégrader encore plus leur résistance à la rupture. Donc, pour pouvoir définir les caractéristiques à exiger des navires devant naviguer dans les eaux arctiques du Canada, il faut commencer par étudier la couverture de glace susceptible d'être rencontrée et les forces d'impact en jeu.

2.2 Normes applicables aux aciers pour emploi aux basses températures

Jusqu'ici, les normes applicables à la construction de navires marchands ont été élaborées par les sociétés de classification qui, indépendamment des constructeurs et des armateurs, ont établi des règles régissant l'étude et la construction de navires. Les neuf plus importantes sociétés de classification sont membres de l'Association internationale des sociétés de classification, chargée de coordonner les activités de ses membres et de formuler une réglementation commune qu'elle publie sous le titre de "Codification des règles". La tâche la plus importante de ces sociétés est de publier des spécifications concernant les caractéristiques des métaux utilisés, ferreux ou non ferreux. Le présent rapport fait un tour d'horizon des aciers entrant dans la construction des coques de navires et ayant d'autres utilisations. Ils sont classés sous les rubriques suivantes:

. Codification des règles - Aciers coque;
. Aciers au carbone-manganèse à ténacité améliorée;
. Aciers ferriques au nickel pour emploi aux basses températures;
. Codes et normes canadiens applicables aux aciers.

Le rapport indique que le Canada produit déjà des aciers appropriés à la construction navale et à d'autres utilisations en milieu arctique et ne nécessitant aucune percée technologique importante.

2.3 État des connaissances sur l'utilisation des aciers aux basses températures

Pour les navires devant naviguer longtemps dans un milieu où les températures de l'air sont basses et où la mer est fortement chargée de glaces, il faut que les matériaux composant les structures ainsi exposées aient fait l'objet d'une étude particulière. Règle générale, les aciers ordinaires sont admissibles jusqu'à -25 °C environ, et dans le cas particulier des tôles minces (épaisseur inférieure à 12,5 mm), jusqu'à -40 °C.

Dans le domaine des températures de référence comprises entre -25 et -55 °C environ, les aciers au C-Mn sont requis; au-dessous de -55 °C, il faut des aciers au nickel ou des aciers inoxydables austénitiques.

Le rapport traite aussi de la soudabilité des aciers et des exigences particulières concernant les électrodes fusibles de préchauffe et de soudage en fonction du métal de base et de la température ambiante à laquelle se fait le soudage.

Le rapport affirme qu'il y a eu peu de cas de ruptures fragiles, depuis l'apparition des aciers résilients. Les quelques cas constatés sont attribuables à des défauts généralement dans la soudure et parfois aussi dans les membrures secondaires.

Ces ruptures ne signifient généralement pas qu'il faille modifier les règles prescrites par les sociétés de classification sur la qualité des aciers entrant dans les bordages ou les profilés. Néanmoins, des règles plus strictes sont élaborées pour prévenir les défauts intrinsèques, notamment dans les soudures. Les ruptures soulignent l'importance qu'il y a d'arrêter la propagation des fissures et l'attention qu'il faut porter aux contraintes thermiques élevées dues à d'importants écarts de températures dans l'épaisseur des tôles ou sur leur surface. Dans le cas particulier des utilisations arctiques, il faut

préconiser l'emploi d'aciers de qualité élevée et prévoir le contrôle rigoureux de cette qualité.

En ce qui concerne les utilisations terrestres, il existe un certain nombre d'aciers pour emploi aux basses températures, qu'il s'agisse d'utilisations générales ou particulières. Citons les aciers ordinaires, les aciers C-Mn et les aciers faiblement alliés. Le rapport passe en revue les applications ferroviaires ainsi que le domaine des pipe-lines, des réservoirs pour liquides cryogéniques et des lignes de transport d'énergie.

Le choix d'aciers pour utilisation en milieu arctique est tributaire de deux facteurs importants: le soudage et la rupture à faible niveau de contrainte. Puisque le soudage risque d'affaiblir l'acier, il faut que l'apport thermique soit maintenu dans un intervalle contrôlé. En outre, le rapport entre apport thermique, métal de base et dureté doit être optimisé.

2.4 Codes régissant l'utilisation des aciers aux basses températures et en milieu arctique

Les constructions métalliques érigées en milieu arctique depuis que la mise en valeur des richesses naturelles de ce territoire s'est accélérée ont mis en évidence les lacunes dans les codes et les règlements existants en ce qui a trait aux conditions de service à prévoir. Pour combler ces lacunes, les constructeurs ont fait appel à leurs observations personnelles et aux résultats des travaux de recherche dans des domaines particuliers. C'est de là qu'est né le concept de la mécanique de la rupture, amenant l'idée de programmes visant à enrayer les ruptures et trouvant une application directe dans l'analyse des contraintes et le choix des matériaux appropriés. On s'est servi de ces programmes pour compléter les codes et les règlements normalement applicables aux régions tempérées.

La prévention des ruptures repose sur trois mesures fondamentales:

- abaissement des niveaux de contraintes théoriques;
- réduction au minimum des concentrations de contraintes;
- utilisation des matériaux plus résilients.

Les exigences techniques plus rigoureuses imposées par les utilisations en milieu arctique ont fait naître un concept nouveau dans l'établissement du bordereau matières. Ce concept s'attaque à l'idée de contraintes d'ensemble et

non plus, comme dans les cas des utilisations plus classiques, de contraintes localisées.

2.5 Aciers ordinaires ou spéciaux

Le rapport détermine les nuances et les qualités des aciers ordinaires possédant les propriétés de soudabilité, ténacité et ductibilité qui les rendent appropriés à un emploi aux basses températures. Ce sont des aciers micro-alliés et des aciers faiblement alliés à haute résistance dits aciers HSLA (high strength and low alloy), fournis en épaisseur allant jusqu'à 100 mm.

Déjà, on prévoit l'amélioration graduelle dans la ténacité et la soudabilité des aciers micro-alliés à faible teneur de carbone et des aciers HSLA, et ce par les moyens suivants:

- emploi accru d'aciers plus "propres" dont les propriétés atteignent la pleine épaisseur des tôles;
- traitements thermo-mécaniques plus évolués des tôles d'acier durant leur élaboration.

Le rapport termine en disant qu'on ne s'attend guère à un développement métallurgique révolutionnaire tel qu'il faille modifier les règlements actuels applicables lorsque les températures d'emploi sont basses. Il fait remarquer qu'il existe déjà des aciers à haute limite d'élasticité possédant une bonne ténacité aux basses températures, mais que des modalités d'exécution particulières doivent être adoptées à leur égard. Le soin particulier apporté lors de leur élaboration et de leur mise en oeuvre ne manquera pas d'en hausser sensiblement le coût.

2.6 Méthodes courantes de contrôle des aciers pour emploi aux basses températures

Au cours des trente dernières années, un certain nombre de méthodes ont été élaborées pour déterminer la résistance des matériaux à la rupture fragile. Plusieurs d'entre elles ont perdu entre-temps leur vogue, soit parce qu'elles ont été remplacées par de meilleures, soit parce qu'elles sont onéreuses, soit enfin parce que leur emploi ne s'est pas généralisé pour diverses raisons. Le rapport fait état des méthodes les plus courantes et les plus acceptées. Ce sont des méthodes qui:

a) analysent les risques de fissuration à partir d'un défaut existant, à savoir:

- essai Charpy,
- essai de flexion par choc à la température de ductilité nulle,
- essai dynamique de déchirure,
- essai sur tôle de grande largeur.

b) déterminent la résistance opposée par le matériau à la propagation de la fissure, à savoir:

- essai mécanique de la rupture élastique linéaire (LEFM),
- essai de l'écartement critique à fond de fissure (COD),
- corrélations des courbes d'énergie des essais de résilience Charpy-V.

2.7 Arrêt de propagation de fissure

Le rapport explique les techniques utilisées pour arrêter la propagation des fissures ainsi que la mécanique de la rupture brutale. Il rappelle brièvement les cas notoires de rupture en architecture navale et l'évolution en la matière au fur et à mesure de l'amélioration dans la qualité des aciers et de l'introduction graduelle de la notion d'arrêt de la fissuration.

Pour qu'une fissure existante puisse se propager, elle doit tirer son énergie de celle qui est disponible dans le matériau, à l'extrémité de la fissure, et seul un changement radical dans les conditions ainsi créées pourra arrêter la propagation de la fissure. Une fissure s'arrêtera donc, lorsqu'elle atteint un des chants ou si elle rencontre un matériau tenace, par opposition à un matériau fragile. À titre d'exemple, mentionnons les deux méthodes d'arrêt suivantes:

- un joint riveté constitue un chant par rapport à la tôle où se produit une fissure brutale dont il arrêtera la propagation;
- une virure faite d'un matériau plus tenace placée sur le chemin de la fissure.

Des procédés décrits comme pouvant enrayer la fissuration ont été étudiés dans divers domaines: aéronautique, construction navale, pipe-lines et réservoirs soudés pour produits pétroliers.

Il n'existe aucun guide de calcul unifié en ce qui concerne les techniques pour arrêter la propagation des fissures dans la structure d'un navire. Chaque société de

classification a établi ses propres règles, fondées largement sur l'empirisme.

Récemment de nouvelles méthodes comparatives ont été mises au point pour l'étude de la mécanique de la rupture, notamment de la mécanique linéaire élastique de la rupture; elles ont permis de déterminer la ténacité que devrait avoir une virure pour arrêter la propagation d'une fissure la traversant.

2.8 Agrément des procédés de soudage

Le rapport passe en revue les modalités prescrites dans les divers codes de soudage: ACNOR, AWS, BSI, ASME, etc., pour l'agrément des procédés de soudage utilisés. Les méthodes d'essai mécaniques réglementaires sont les essais de flexion, les essais de traction pour la détermination de la limite d'élasticité, de la résistance à la rupture et de l'allongement, et les essais Charpy exécutés sur la soudure et aux endroits désignés de l'assemblage soudé.

La première condition prescrite pour ces essais est que les soudures éprouvées soient pleinement représentatives: matériau, apport thermique, modes d'exécution et montage. Pour des raisons métallurgiques et mécaniques, il est important que les éprouvettes aient l'épaisseur du produit à examiner et qu'elles comportent une entaille aiguë représentant le défaut de soudure.

Le rapport conclut en disant que les normes régissant la construction de navires de cote arctique devraient s'inspirer de celles qui régissent les réservoirs sous pression, et qu'il serait utile d'adopter une méthode de contrôle de la qualité prenant en compte l'ensemble des paramètres régissant la construction. C'est précisément ce que fait le Lloyd's Register of Shipping dans la norme provisoire qu'il est en train d'élaborer.

3. SÉLECTION DES ESSAIS ET DÉFINITION DES MODES OPÉRATOIRES

3.1 Introduction

Le mode opératoire des essais que recommande le rapport fixe à -50 °C la température minimale de référence. Mais ce mode reste quand même assez souple pour aider dans le choix de l'acier, sans égard à la température. Il vise surtout l'essai des soudures de l'acier coque, parce que ce sont elles qui risquent le plus de céder en raison de défauts d'exécution et d'une ténacité indéterminée.

3.2 Essais Charpy

Au Royaume-Uni, au Japon et dans presque tous les pays du continent européen, c'est en grande partie sur les essais Charpy-V que se fonde la sélection des qualités d'acier en fonction des risques de rupture fragile. Les codes y relatifs prescrivent des niveaux précis d'énergie de rupture, en fonction de la température de référence, de l'épaisseur du produit et des niveaux de contrainte, exigences qui, le plus souvent, sont fondées sur des notions empiriques justifiées par la seule expérience.

Le rapport recommande:

- que les essais Charpy continuent d'être le critère d'agrément à condition que soient chiffrées les valeurs des énergies de rupture correspondant à la température de service visée;
- que la sélection des éprouvettes Charpy et autres types d'éprouvettes se fasse dans l'intention de trouver la zone où le niveau de résilience est le plus bas;
- que l'on obtienne lors de l'agrément du procédé de soudage les courbes de transition de résilience correspondant aux essais Charpy-V, de manière à trouver, d'une part, les corrélations entre le paramètre COD/LEFM (voir 2.6), et, d'autre part, les valeurs tirées des essais de résilience Charpy. On pourra alors se servir de ces dernières comme critère de contrôle qualitatif en cours de construction, c'est-à-dire pour déterminer si les niveaux de résilience voulus ont été atteints dans les soudures et dans le métal de base.

3.3 Mesure du COD

Le rapport préconise, pour la validation des aciers coque, une approche qui fait appel à la mesure du COD et qui formerait la base d'un programme logique et non restrictif visant à arrêter la propagation des fissures. En effet, cette valeur du COD permettrait une comparaison chiffrée des aciers, en plus de mener à une différenciation des fissures jugées admissibles de celles qui ne le sont pas. Enfin, le concept du COD pourrait s'appliquer directement à une évaluation des risques courus, à un degré que les autres méthodes ne permettaient pas. Ainsi, l'inspection se limiterait à déceler les fissures dont l'écartement est supérieur à celui que le calcul a montré comme pouvant mener à une rupture fragile.

Ce rapport se fonde, pour recommander cette approche, sur le fait que, sous l'action d'une charge en traction normale au plan de la fissure, on observe en fond de fissure un écartement progressif des faces de celle-ci. Il est par ailleurs admis que cet écartement doit atteindre une valeur critique pour que la propagation se fasse, soit lentement (déchirure ductile), soit brutalement et irrégulièrement.

Ladite approche est à la base du document PD 6493 récemment publié par le British Standards Institution et qui traite en détail de l'élaboration des normes d'agrément. Il propose des critères pour la conversion des divers types de défectuosité en défauts normalisés traversant les tôles et permettant d'en arriver à une décision d'agrément ou de refus. Il établit la méthode à suivre pour déterminer l'interaction des défauts entre eux, les contraintes et autres considérations. Cette méthodologie a été agréée par certains pouvoirs publics, notamment aux États-Unis, en Europe et au Japon.

De tous les essais considérés, seuls l'essai de flexion par choc (essai Pellini) et l'essai Charpy avec enregistrement des résultats sont jugés comme suffisamment appropriés pour pouvoir être d'un emploi utile.

4. SÉLECTION DES ACIERS PAR ANALYSE DES RISQUES

4.1 Introduction

Le présent rapport esquisse une méthode pour la sélection des aciers coque pour utilisation aux basses températures, et qui repose sur le concept de la mécanique de la rupture, compte tenu des contraintes, de l'importance du défaut et de la ténacité de l'acier. Par la définition des conditions propices à une rupture brutale, il est possible de chiffrer le risque couru en même temps que les risques que ferait courir l'influence forfuite de certains paramètres importants, la température, par exemple. Cependant, une base de données très vaste devra être accumulée au cours des prochaines années avant que la méthode préconisée ne puisse devenir exploitable.

Jusqu'ici, les normes de dimensionnement des structures navales ont été largement empiriques et déterministes. Cependant, à l'instar des autres domaines industriels, la tendance à la mise en oeuvre de notions probabilistes a lentement prévalu. Elles consistent à calculer les probabilités inhérentes à l'apparition d'un événement donné.

Or, les incertitudes entourant les charges réelles de service sont telles que la définition exacte de tel ou tel critère de calcul n'aurait de sens que dans une seule de toutes les éventualités de charge possibles, sans oublier que les probabilités d'une telle éventualité puissent être extrêmement faibles. Donc, le risque global encouru ne saurait être valablement chiffré que si toutes les éventualités de charge pouvaient être prises en compte, en même temps que la probabilité de l'avènement de chacune d'elles.

Pour être vraiment utile, la méthode d'évaluation des risques doit pouvoir dégager des situations de charge significatives et produire un modèle qui servira de base de comparaison avec l'expérience vécue et qui permettra d'affiner les calculs de manière à en accroître la précision.

Cette méthode convient très bien lorsqu'il s'agit de sélectionner des aciers pour utilisations aux basses températures. Cette section du rapport propose un modèle mathématique applicable au calcul des risques et permettant d'évaluer la tenue des différentes zones renforcées de la coque, après ajustement en fonction des statistiques de rupture connues.

4.2 Concept de risque

Le rapport se penche sur le concept de risque dans le contexte de la navigation maritime dans l'océan Arctique. Il donne des statistiques internationales sur les ruptures dans les structures navales, corrélativement à la nature hostile de l'environnement, à l'éloignement et à la difficulté de secourir le navire en cas d'avaries.

4.3 Ruptures

Alors que la fatigue peut occasionner des ruptures et aggraver tout défaut dans le métal de base et dans une soudure, le problème le plus préoccupant est celui d'une rupture catastrophique conséquente à la propagation brutale d'une fissure. Une telle éventualité dépend d'un grand nombre de facteurs, dont les plus importants sont les trois suivants:

- un facteur de contrainte: défaut ou entaille;
- un niveau de contrainte ou de déformation induite qui, conjugué à la géométrie du défaut, est au moins égal à la ténacité critique de l'acier;
- la ténacité de l'acier considéré.

Le rapport fait état d'une formule simplifiée pour l'évaluation du risque de la rupture. C'est une formule probabiliste qui relie entre eux les facteurs fragilisants les plus importants, contribuant à l'amorçage et à la propagation brutale d'une fissure. Elle contribue ainsi à améliorer la sécurité de la navigation maritime dans les mers glacées.

4.4 Paramètres

Le modèle mathématique proposé s'appuie sur un diagramme simple des contraintes présentes dans le pont supérieur, majoré de l'effet d'une concentration des contraintes. Il existe, certes, des situations de charge plus complexes, pouvant donner lieu à un rapport contrainte/déformation plus péjorant, mais leur définition reste extrêmement difficile. Étant donné que cette étude visait à une comparaison des comportements, une approche plus simple se trouve justifiée.

Les différentes contraintes induites dans le pont sont les suivantes:

- les contraintes résiduelles,
- les contraintes en eau calme,
- les contraintes thermiques,

- les contraintes provoquées par la houle,
- les contraintes de choc (charge des glaces),
- le retour élastique.

Ce qui distingue ces contraintes les unes des autres, c'est surtout leur taux de variations cycliques, l'exemple le plus péjorant de tous étant celui des contraintes de choc.

La grande inconnue, ce sont les contraintes d'impact avec les glaces, pour lesquelles on ne possède pas de données remontant bien loin dans le temps. Malgré les nombreuses recherches faites pour dégager un ordre de grandeurs à prendre en compte, il reste que les données obtenues ne sont pas encore exploitables statistiquement.

Les deux propriétés des aciers que toute modélisation des risques de rupture doit considérer en priorité sont la limite élastique et la ténacité, qui varient toutes deux avec la température.

4.5 Caractère probabiliste des paramètres

Les paramètres mentionnés précédemment appartiennent à deux groupes, selon qu'ils évoluent ou non dans le temps. Le premier groupe intéresse les températures et les contraintes, et le deuxième les propriétés mécaniques, les défauts et les concentrations de contrainte qui découlent de ces derniers.

Les paramètres qui évoluent dans le temps dépendent aussi de l'environnement et, donc, du lieu géographique.

Aussi, il est normal que les probabilités de contraintes et de températures soient calculées cumulativement, permettant ainsi de dégager la probabilité d'un dépassement.

4.6 Modèle mathématique de base

Un modèle mathématique prenant en compte tous les éléments de risque dans un navire est trop complexe pour être retenu. Il y aurait plutôt lieu de considérer une seule tôle dont on tirera des données générales sur les risques qu'elle présente, jusqu'au moment où il sera possible de corréler ces risques à ceux courus par le navire dans son ensemble. Un tel élément, comportant nécessairement une soudure, serait un composant représentatif du navire et à qui serait attribuée une gamme de défauts et de degrés de ténacité correspondant aux diverses parties du navire et à l'épaisseur considérée.

Évidemment, l'importance des défauts et le degré de ténacité vont varier avec l'épaisseur. Une telle façon de procéder permettra de dégager un ordre de grandeur des contraintes présentes dans chacune des parties du navire.

5. CONCLUSIONS

Ce rapport a montré que les conditions de navigation dans les eaux arctiques, bien que rigoureuses, ne sont nullement uniques puisqu'un nombre élevé d'ouvrages ont pû être construits dans des environnements aussi hostiles. Par contre, il a clairement fait ressortir le besoin d'un contrôle plus serré des structures navales, et notamment des fissures, lorsqu'on prévoit une navigation hivernale dans ces eaux.

Le rapport a fait un tour d'horizon des aciers pour utilisations maritimes et non maritimes et a mis en évidence ceux qui conservent une bonne ténacité aux basses températures et qui sont disponibles sur le marché canadien. Il a révélé en outre l'existence d'un grand nombre d'aciers brevetés de haute ténacité, obtenus grâce à des traitements thermo-mécaniques compliqués et qui se vendent actuellement au Canada.

Il conclut que, dans l'état actuel des connaissances concernant les exigences de la navigation arctique, la gamme des aciers actuels semble suffire aux besoins. En effet, affirme-t-il, il suffit d'adapter les normes de dimensionnement et de construction en vigueur pour que les aciers actuels soient utilisables selon les pratiques actuelles d'assemblage et de soudage. Dans certains cas, il faudra prévoir une inspection et un contrôle de la qualité des soudures, plus serrés que ne l'exige la pratique dans les chantiers navals.

Et même si, dans de rares cas, il faut être un peu plus exigeant dans le choix des aciers, on ne prévoit pas que leur façonnage ou leur soudage puisse présenter de problème.

Le rapport traite ensuite du problème des fissures aux basses températures et de la tendance actuelle vers une méthode plus quantitative pour les enrayer. Il montre l'utilité des essais destructifs fondés sur le concept de la mécanique de la rupture, dans le dimensionnement des structures. Ce sont là des techniques qui ont été largement éprouvées sous des environnements très sensibles ou dans des situations risquées. La méthode préconisée s'appuie sur une évaluation de la résistance de l'acier à un amorçage et à une propagation rapide des fissures.

Pour prévenir et limiter les risques d'avaries dues à une rupture brutale, les aciers fournis doivent avoir la ténacité voulue, vérifiée tout au long des processus de

dimensionnement, de construction, de soudage, etc., et assurée par un contrôle de la qualité, des essais non destructifs et la prévision de dispositifs pour arrêter la propagation de fissures dans les organes les plus vitaux. Cette méthode part de l'idée qu'une rupture brutale peut arriver, d'où l'importance à accorder à un dispositif pour l'arrêter, sauvegardant ainsi le navire, son équipage et sa cargaison.

L'idée de faire appel au calcul des probabilités, pour évaluer les risques courus par l'emploi d'un acier, ouvre la voie vers une méthode plus rationnelle et d'une portée plus vaste qui pourra se matérialiser dès que les données statistiques requises seront disponibles en quantité suffisante. Le rapport explique en quoi consiste cette méthode fondée sur le concept de la mécanique de la rupture, utilisant une approche probabiliste et permettant d'établir un tableau comparatif des risques courus dans la sélection des aciers pour emploi aux basses températures. Mais pour devenir pleinement exploitable, cette méthode exige une base de données fiable sur tous les paramètres importants qu'elle doit prendre en compte.